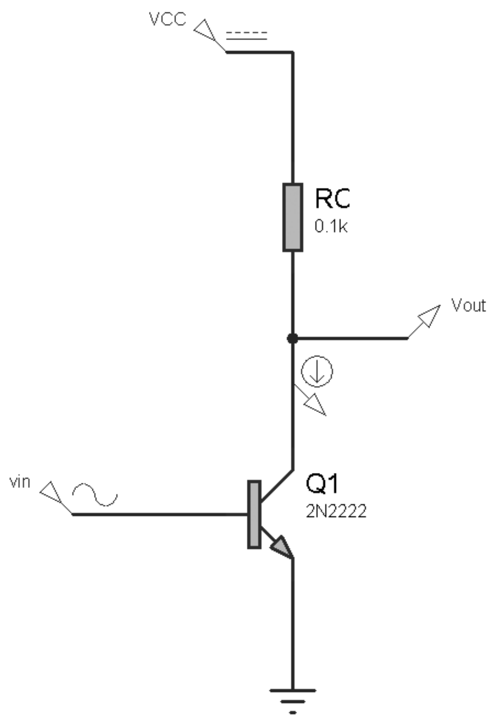
بنام خدا

عنوان درس: الکترونیک ۲

مبحث اول: مروری بر درس الکترونیک ۱

کاوه کنگرلو
k_kangarloo@yahoo.com

مثال: در مدار مقابل رابطه ولتاژ خروجی بر حسب ورودی را محاسبه نموده و سپس مشخصه مذکور را ترسیم نمایید.



VCC = 5 v
RC = 0.1 k

حل: جریان عبور از ترانزیستور با صرفنظر از مدولاسیون عرض بیس چنین خواهد بود:

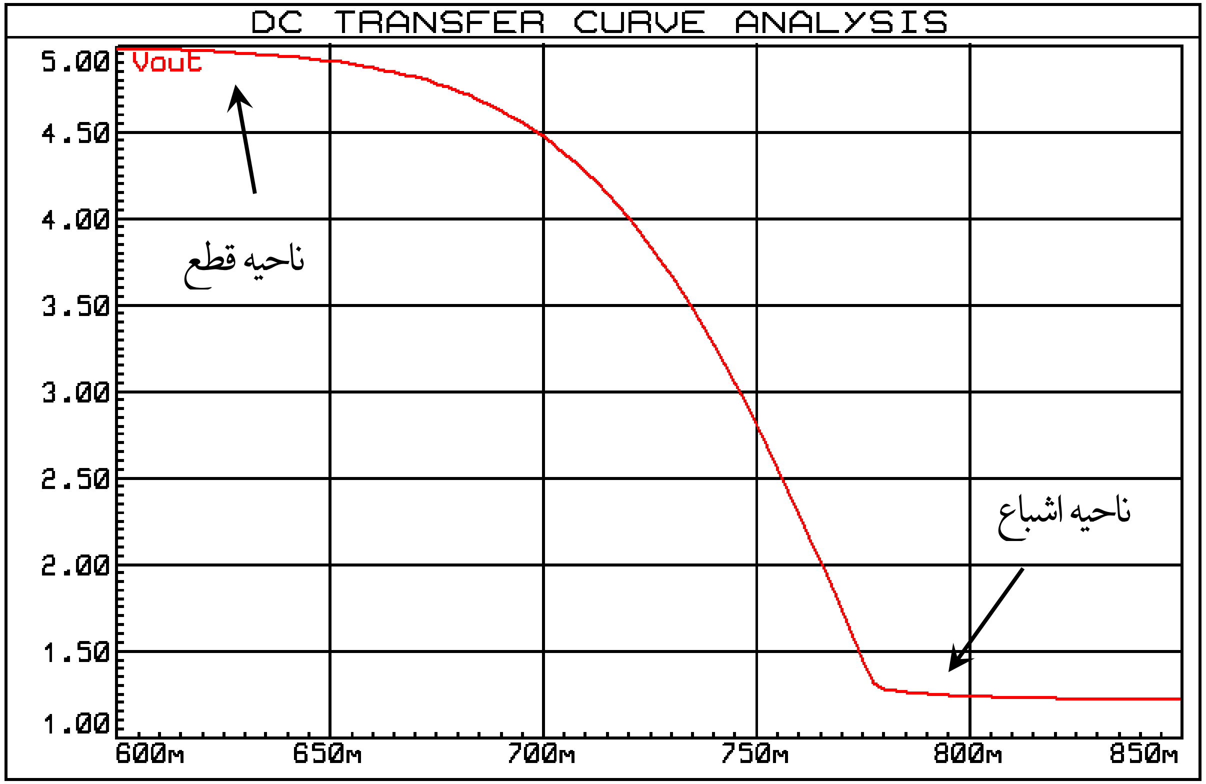
$$I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad , \quad V_{BE} = V_{in}$$

$$\Rightarrow \quad I_C = I_S \cdot e^{\frac{V_{in}}{V_T}}$$

با این وصف، رابطه ولتاژ خروجی محاسبه خواهد شد؛ که کاملاً غیرخطی است !

$$V_{out} = V_{CC} - I_C \cdot R_C$$

$$\rightarrow \quad V_{out} = V_{CC} - R_C \cdot I_S \cdot e^{\frac{V_{in}}{V_T}}$$



تذکر: شیب خط مماس بر منحنی مشخصه سیگنال بزرگ، بهره سیگنال کوچک است.

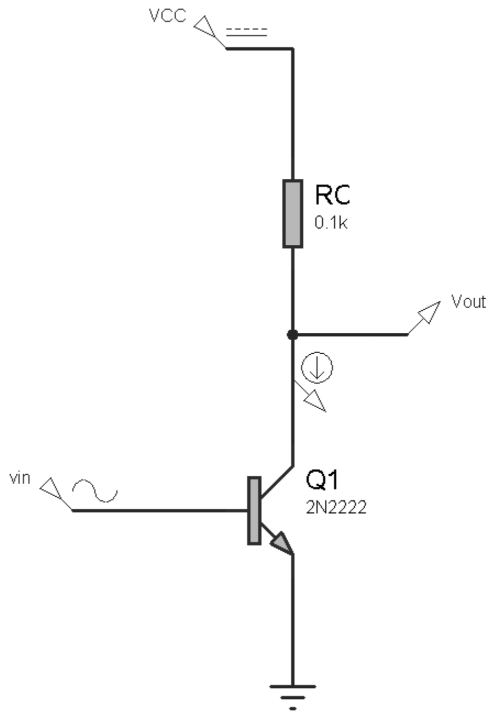
$$V_{out} = V_{CC} - R_C \cdot I_S \cdot e^{\frac{V_{in}}{V_T}}$$

$$\frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} = -R_C \cdot I_S \cdot \frac{1}{V_T} \cdot e^{\frac{V_{in}}{V_T}} \simeq -R_C \cdot \frac{I_{EQ}}{V_T} = -\frac{R_C}{r_e}$$

با این وصف، بهره ولتاژ وابسته به نقطه کار و همچنین دما (از طریق وابستگی به V_T) خواهد بود.

تذکر: اگر توابع انتقال یک تقویت‌کننده به پارامترهای ترانزیستور بستگی داشته باشد در اینصورت تغییر نقطه کار (در اثر اعمال ورودی و تلاطم جریان‌ها) موجب تغییر آنها خواهد شد که این مطلوب نیست.

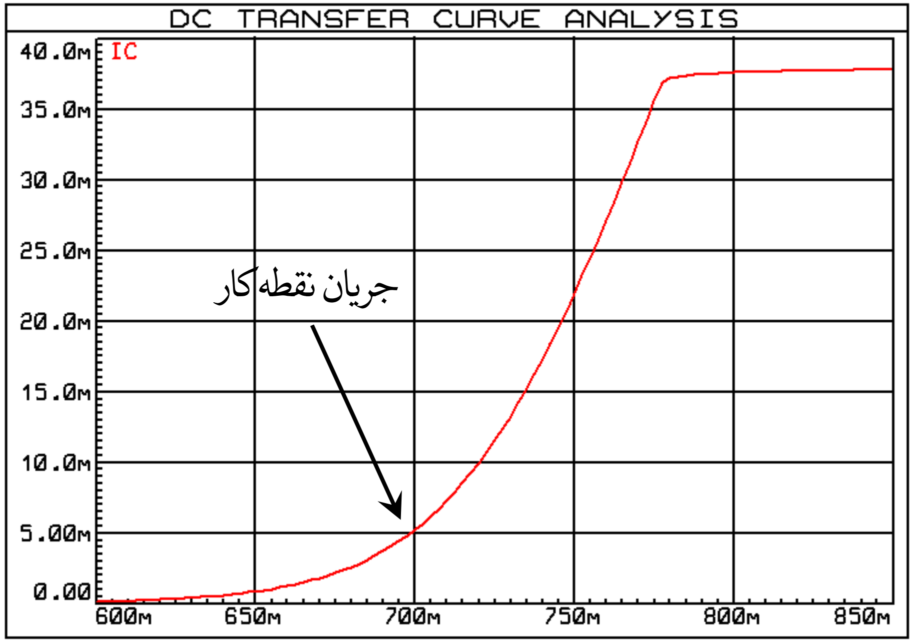
مثال: در مدار مقابل، ورودی سیگنال سینوسی متناوب با دامنه سه میلی‌ولت و مقدار مستقیم هفتصد میلی‌ولت است؛ شکل موج خروجی تقویت‌کننده را ترسیم نمایید.



VCC = 5 v   Vin = 700 + 3 Sin wt   mv

RC = 0.1 k

حل: مشخصه جریان ترانزیستور بر حسب ورودی در نمودار زیر ترسیم شده است؛ چنانچه مولفه مستقیم ورودی هفتصد میلی‌ولت باشد در اینصورت جریان نقطه کار ترانزیستور حدود پنج و سه دهم میلی‌آمپر خواهد بود.

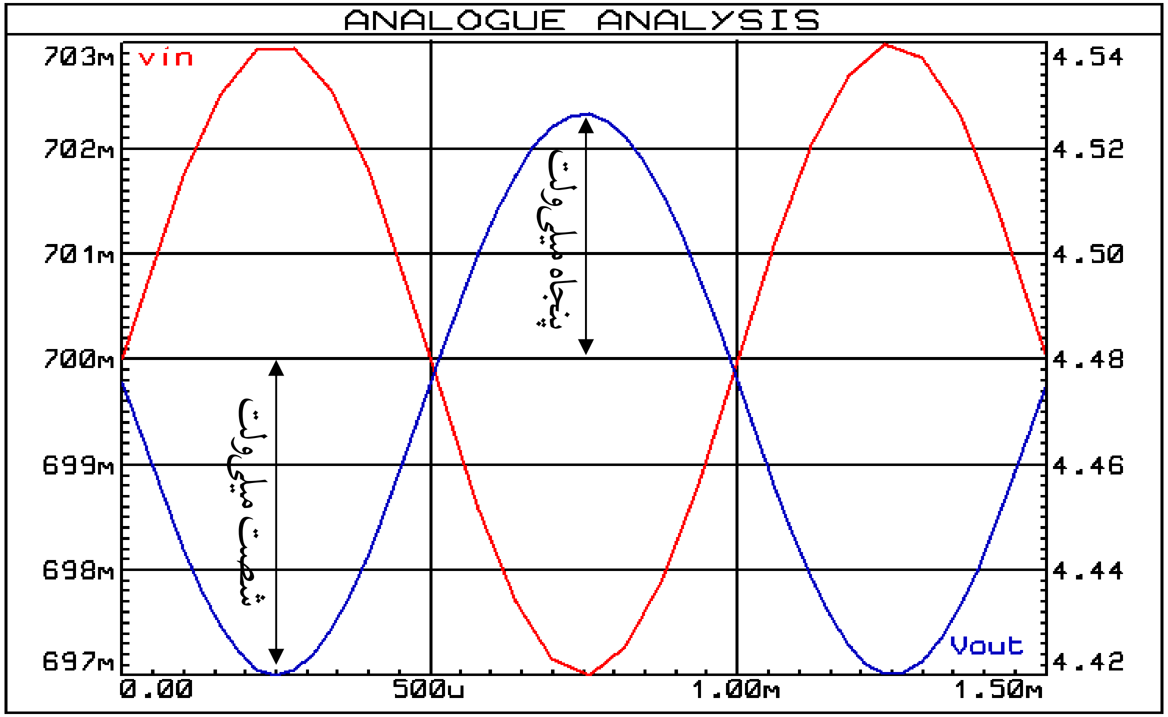


$$I_C \simeq 5.3 \quad mA \quad \rightarrow \quad I_E \simeq I_C = 5.3 \quad mA$$

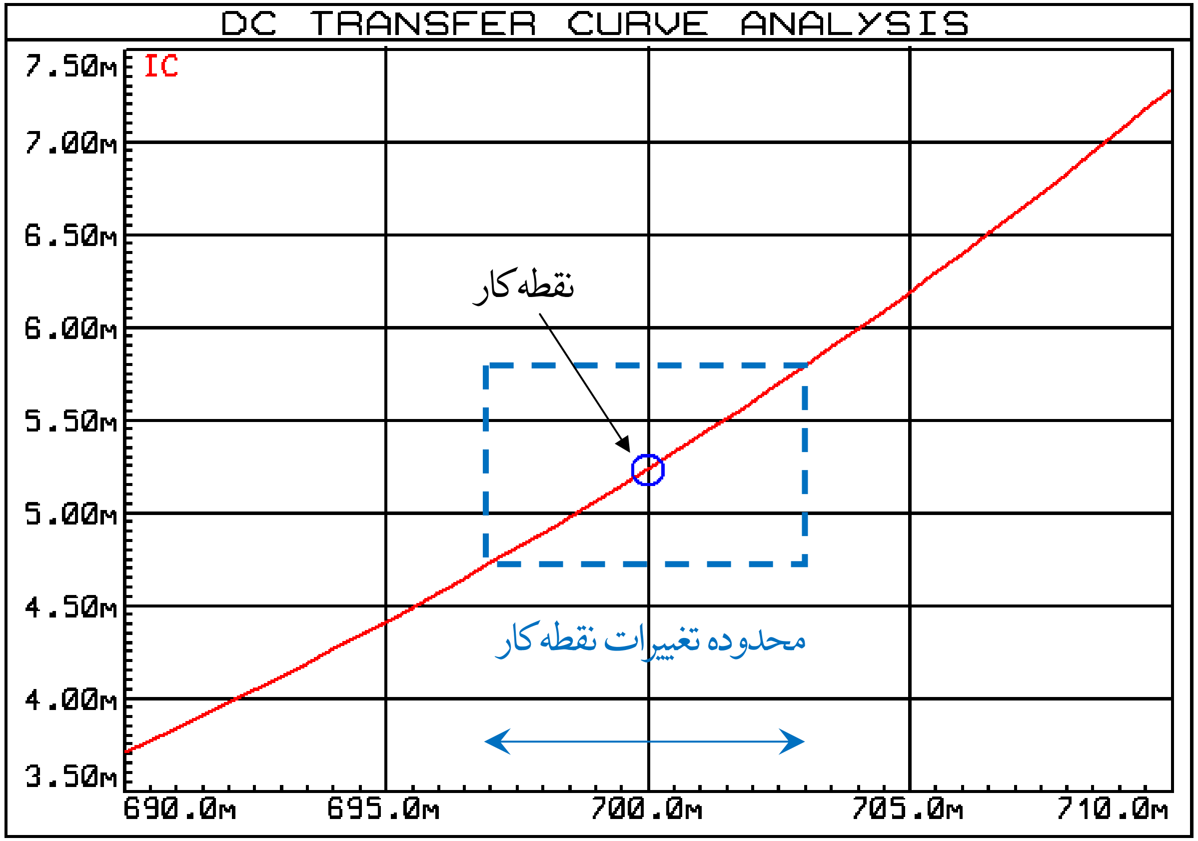
$$r_e = \frac{V_T}{I_{EQ}} = \frac{25\times10^{-3}}{5.3\times10^{-3}} = 4.7 \quad \Omega$$

$$A_v = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{100}{4.7} = -21.2$$

در شکل زیر، سیگنال خروجی به همراه ورودی ترسیم شده است. نمودار قرمز رنگ بیانگر ورودی و محور سمت چپ به آن اختصاص دارد و نمودار آبی رنگ خروجی است که محور سمت راست بر اساس آن مدرج گردیده است. همانگونه که ملاحظه می‌شود قله تا قله (پیک تا پیک) ورودی شش میلی ولت و خروجی یکصد و ده میلی ولت است که به معنای بهره ولتاژی در حدود ۱۸/۲ است.

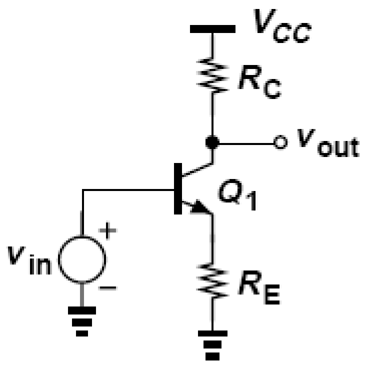


اما اگر کمی دقت کنیم متوجه می‌شویم که شکل موج خروجی متقارن نیست نیم‌سیکل مثبت بیشتر از نیم‌سیکل منفی تقویت شده است. اگر مشخصه جریان ترانزیستور را در حول نقطه کار بررسی کنیم، بسادگی علت آن را خواهیم یافت.



با افزایش جریان نقطه کار در نیم‌سیکل‌های مثبت ورودی، مقدار r_e کاهش یافته و بهره ولتاژ زیاد می‌شود؛ بالعکس در نیم سیکل‌های منفی، r_e افزایش یافته و نتیجتاً بهره کم می‌شود !

تذکر: اگر مقاومتی بر امیتر ترانزیستور قرار گیرد (تبهگن) در اینصورت بهر ولتاژ کاهش می‌یابد اما وابستگی بهره به Q3 از بین می‌رود.

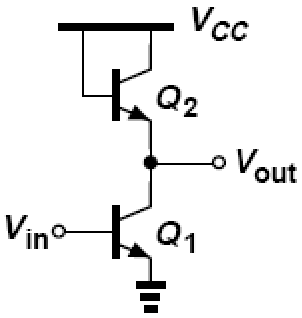


$$A_V \simeq -\frac{R_C \parallel ro}{re + R_E}$$

$$R_E \gg re \,, ro \gg R_C \quad \rightarrow \quad A_V \simeq -\frac{R_C}{R_E}$$

این مقاومت فیدبکی ایجاد می‌کند که پیامد آن رفتاری خطی‌تر است؛ در مبحث فیدبک این موضوع دقیقتر مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مثال: در مدار مقابل، مشخصه ولتاژ خروجی بر حسب ولتاژ ورودی را ترسیم نمایید.



حل:

$$I_{C1} = I_{S1} \cdot e^{\frac{V_{BE_1}}{V_T}} \quad , \quad V_{BE_1} = V_{in}$$

$$\Rightarrow \quad I_{C1} = I_{S1} \cdot e^{\frac{V_{in}}{V_T}}$$

$$I_{C2} = I_{S2} \cdot e^{\frac{V_{BE_1}}{V_T}} \quad , \quad V_{BE_2} = V_{CC} - V_{out}$$

$$\Rightarrow \quad I_{C2} = I_{S2} \cdot e^{\frac{V_{CC} - V_{out}}{V_T}}$$

جریان ترانزیستورها تقریباً با هم برابر هستند بنابراین:

$$I_{C2} \simeq I_{C1}$$

$$\Rightarrow \quad I_{S1} \cdot e^{\frac{V_{in}}{V_T}} \simeq I_{S2} \cdot e^{\frac{V_{CC} - V_{out}}{V_T}}$$

$$\Rightarrow \quad \frac{V_{in}}{V_T} \simeq \ln\left(\frac{I_{S2}}{I_{S1}}\right) + \frac{V_{CC} - V_{out}}{V_T} \quad \Rightarrow \quad V_{out} \simeq V_{CC} - V_{in} + V_T \cdot \ln\left(\frac{I_{S2}}{I_{S1}}\right)$$

و در نتیجه:

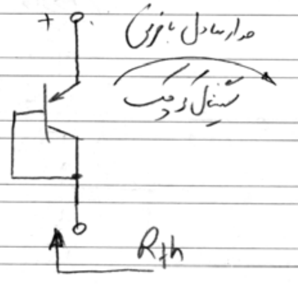
$$\frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} = -1$$

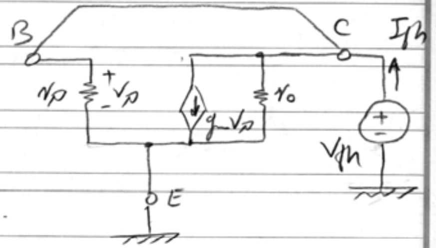
← بهره سیگنال کوچک

تذکر: بهره سیگنال کوچک در مدار فوق را می‌توان چنین برآورد کرد:

$$A_v = -\frac{\left(re_2 \parallel r_{\pi 2} \parallel r_{O2}\right) \parallel r_{O1}}{re_1} \simeq -\frac{re_2}{re_1} = -1$$

یادداشت:



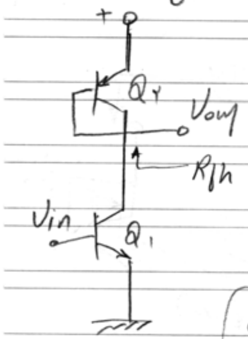


$$v_\pi = v_{th}$$

$$I_{th} = g_m \cdot v_\pi + \frac{v_{th}}{r_o} + \frac{v_{th}}{r_\pi} = g_m \cdot v_{th} + \frac{v_{th}}{r_o} + \frac{v_{th}}{r_\pi}$$

$$\Rightarrow I_{th} = v_{th}\left(g_m + \frac{1}{r_o} + \frac{1}{r_\pi}\right) \Rightarrow R_{th} = \frac{1}{g_m} \parallel r_\pi \parallel r_o$$

$$\Rightarrow R_{th} \simeq \frac{1}{g_m}$$



$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \simeq -\frac{R_{th} \parallel r_{o1}}{r_{e1}}$$

$$A_v \simeq -\frac{\frac{1}{g_{m2}} \parallel r_{o1}}{\alpha \cdot \frac{1}{g_{m1}}} \simeq \frac{g_{m1}}{g_{m2}}$$

$$\alpha \simeq 1$$

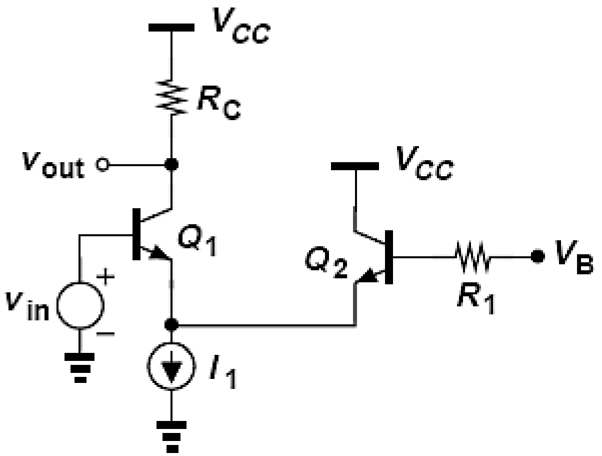
$$g_m = \frac{I_{CQ}}{V_T}$$

s.a.m

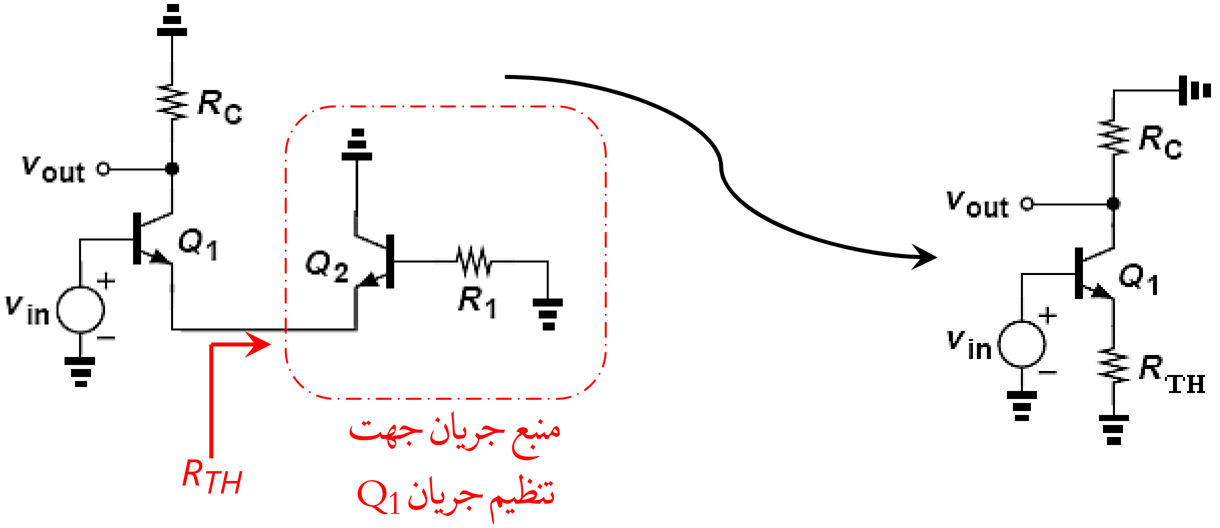
مشخصه خروجی (سیگنال بزرگ) در شکل زیر نمایش داده شده است؛ محور افقی بیانگر ولتاژ ورودی و محور عمودی نیز ولتاژ خروجی است. مشخصه خطی است !

سوال: اگر جریان دو ترانزیستور دقیقاً یکی نباشد در اینصورت ترارسانایی (g_m) آنها برابر نبوده و در نتیجه بهره ولتاژ را می‌توان مقداری دلخواه تنظیم کرد؛ بعنوان نمونه اگر جریان عبوری از Q_2 کمتر از Q_1 باشد در اینصورت بهره ولتاژ بیشتر از یک خواهد شد (با این توضیح که در دامنه وسیعی از تغییرات ورودی، بهره ولتاژ تغییر نخواهد کرد و تقویت‌کننده‌ای خطی طراحی کرده‌ایم). آیا برای پیاده‌سازی این ایده، می‌توانید تغییراتی در مدار اعمال کنید؟

مثال: در مدار مقابل بهره ولتاژ را محاسبه نمایید.



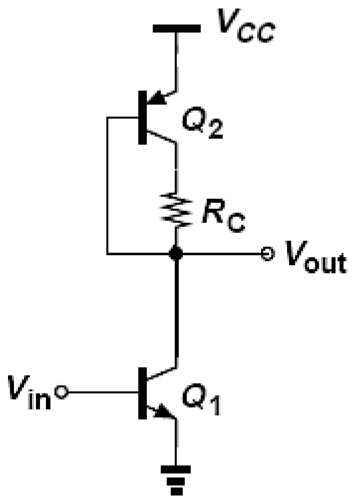
حل: مدار معادل در تحلیل دینامیکی چنین خواهد بود:



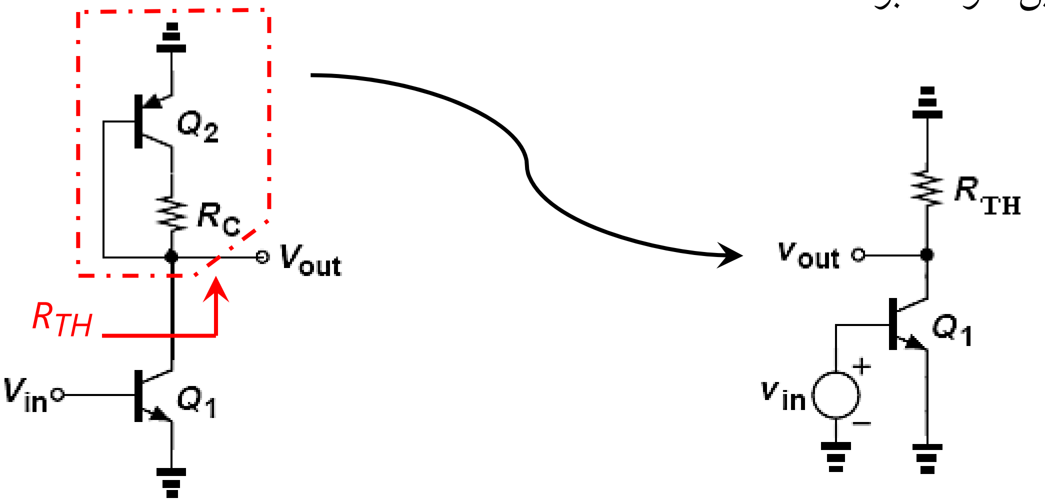
$$R_{TH} \simeq re_2 + \frac{R_1}{1+\beta_2}$$

$$A_V \simeq -\frac{R_C \parallel ro_1}{R_{TH}}$$

مثال: در مدار مقابل بهره ولتاژ و مقاومت ورودی را محاسبه نمایید.



حل: مدار معادل در تحلیل دینامیکی (حالت ac) چنین خواهد بود:

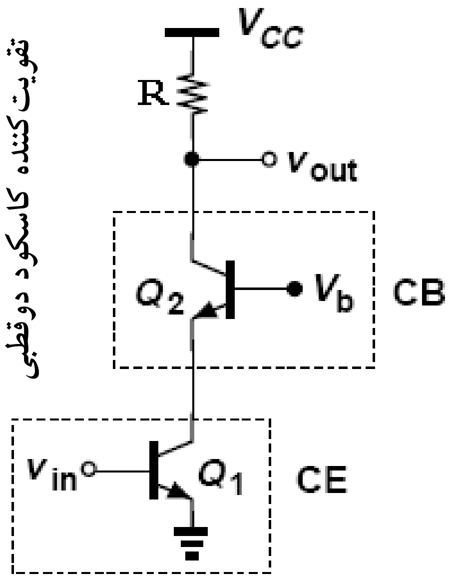


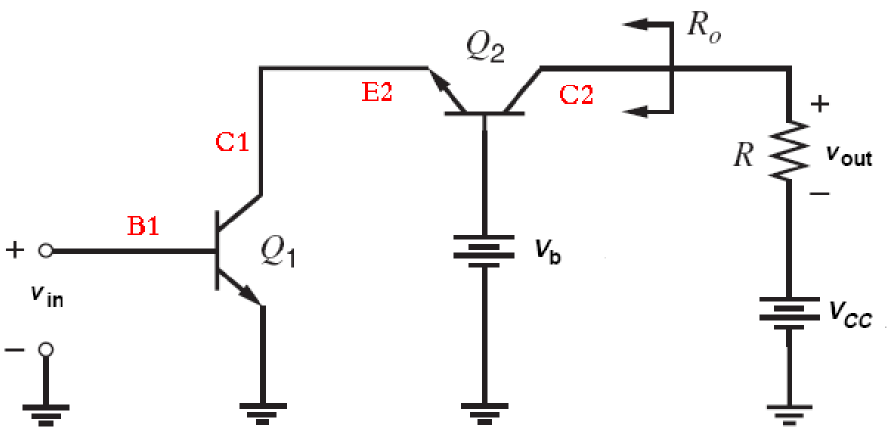
$$R_{TH} \simeq r\pi_2 \,\|\, \frac{R_C + ro_2}{1+g_{m2}\cdot ro_2}$$

$$A_V \simeq -\frac{R_{TH} \,\|\, ro_1}{re_1}$$

آرایش کاسکود (Cascode): همانگونه که دیدم آرایش‌های امیتر مشترک، بیس مشترک و کلکتور مشترک آرایش‌های نام آشنایی هستند که در طراحی غالباً بکار گرفته می‌شوند اما هر کدام مزایا و معایب خود را به همراه دارند. می‌توان با ترکیب آنها، تقویت‌کننده‌های جدیدی طراحی کرد که کاستی‌های آرایش‌های سه‌گانه را نداشته و بتوانند بعنوان بلوک‌های پایه با شاخصه‌های بهبود یافته در طراحی تقویت‌کننده‌ها استفاده شوند. کاسکود یکی از این گونه‌ها و مبتنی بر زوج ترانزیستور است؛ آرایش کاسکود از ترکیب یک طبقه امیترمشترک و یک طبقه بیس‌مشترک ایجاد می‌شود. بهره ولتاژ بالا، پهنای باند وسیع و مقاومت ورودی تقریباً زیاد از مزایای آن به شمار می‌آید.

تقویت کننده کاسکود دوقطبی



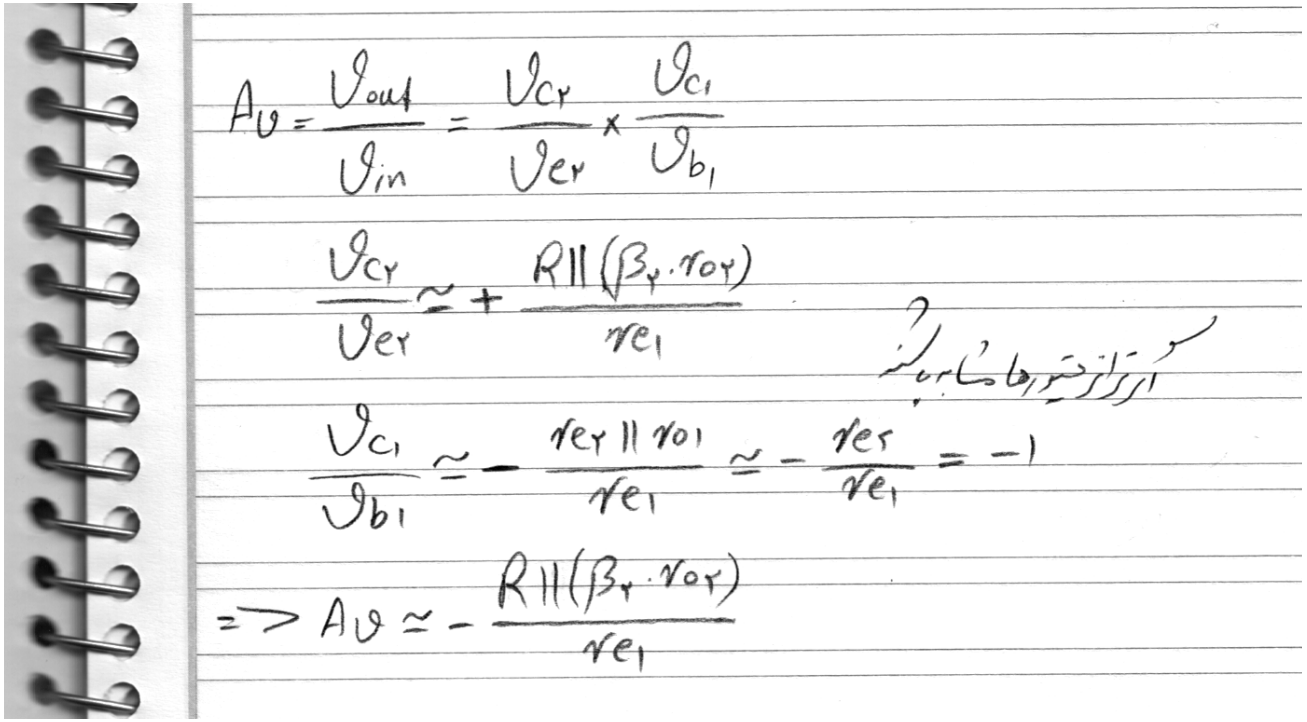


$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \simeq -\frac{R \,\|\, (\beta_2 \cdot ro_2)}{re_1} \simeq -g_{m2} \cdot R \qquad , \qquad \beta_2 \cdot ro_2 \gg R$$

$$R_{out} \simeq R \,\|\, R_o \qquad , \qquad R_o = \beta_2 \cdot ro_2$$

$$R_{in} = r\pi_1$$

یادداشت:



$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{v_{c۲}}{v_{e۲}} \times \frac{v_{c۱}}{v_{b۱}}$$

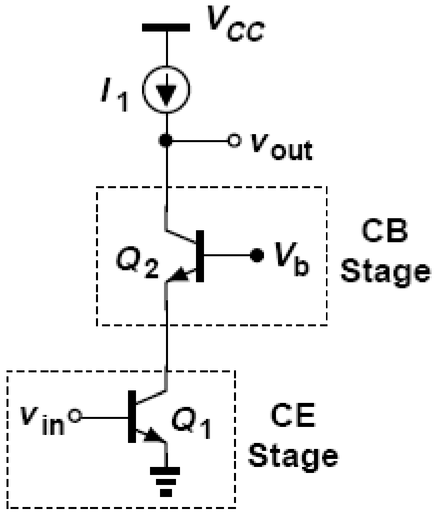
$$\frac{v_{c۲}}{v_{e۲}} \simeq + \frac{R \,\|\, (\beta_۲ \cdot ro_۲)}{re_۱}$$

اگر ترانزیستورها مشابه باشند

$$\frac{v_{c۱}}{v_{b۱}} \simeq - \frac{re_۲ \,\|\, ro_۱}{re_۱} \simeq - \frac{re_۲}{re_۱} = -۱$$

$$\Rightarrow A_v \simeq - \frac{R \,\|\, (\beta_۲ \cdot ro_۲)}{re_۱}$$

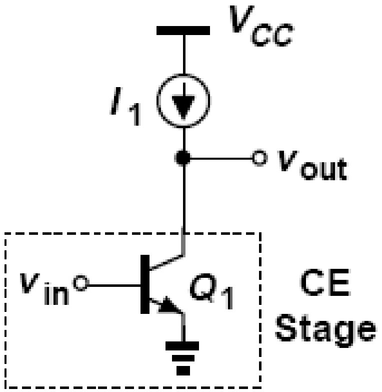
تذکر: اگر بار R به قالب منبع جریان طراحی شود در اینصورت بیشترین بهره ولتاژ ممکن بدست خواهد آمد:



$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \simeq -\frac{\beta_2 \cdot ro_2}{re_2}$$

(در حدود ۲۰۰/۰۰۰) !!!

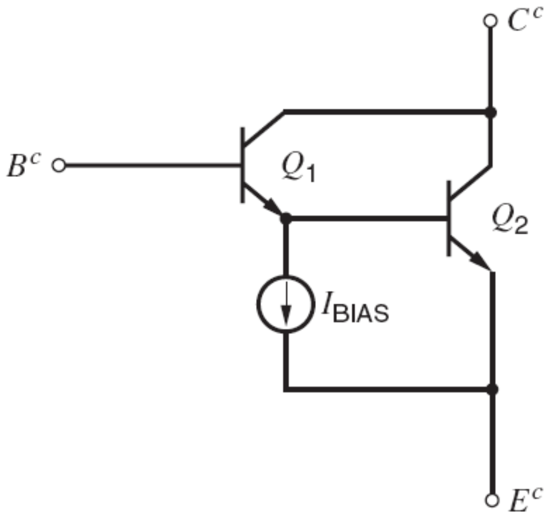
و اگر این مقدار را با بهره ولتاژ یک ترانزیستور تنها با آرایش امیتر مشترک مقایسه کنیم متوجه می‌شویم که بهره ولتاژ با ضریب β بزرگتر شده است!



$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \simeq -\frac{ro}{re}$$

بهره ذاتی

آرایش دارلینگتون (Darlington): ؛ دارلینگتون نیز یکی از بلوک‌های پایه (زیرمدار) پرکاربرد در طراحی تقویت‌کننده‌ها است.



منبع جریان برای بالابردن جریان نقطه کار Q1 و بهبود رفتار فرکانسی تقویت‌کننده است؛ این مهم را در مباحث بعدی ملاحظه خواهید کرد.

با این نحوه اتصال، ترانزیستور مرکبی ایجاد می‌شود که می‌تواند در آرایش‌های سه‌گانه مورد استفاده قرار گیرد با این تفاوت که شاخصه‌های حاصل از آن در مدارهای طراحی شده بهبود چشمگیری می‌یابد. بعنوان نمونه اگر در آرایش کلکتور مشترک مورد استفاده قرار گیرد، حاصل بافر ولتاژی است که مقاومت ورودی آن بسیار بالا و مقاومت خروجی آن بسیار کم است و یا اگر در آرایش امیتر مشترک مورد استفاده قرار گیرد در اینصورت تقویت‌کننده‌ای ایجاد خواهد شد که مقاومت خروجی بسیار کمتری نسبت به امیتر مشترک ساده دارد (بواسطه فیدبکی که توسط مقاومت خروجی ترانزیستور Q1 ایجاد می‌شود، این موضوع در مبحث فیدبک بررسی خواهد شد).

پایان